

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Návrh a realizace simulátoru metalických vedení
(Design and implementation of metallic lines simulator)

2010

Muhini Lucas Kahare

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Muhini Lucas Kahare

Poděkování

Chtěl bych touto cestou poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Zdenku Tesařovi, za veškerou pomoc, odvahu, konzultace a připomínky spojené s vypracováním mé bakalářské práce a Dr. Ing. Liboru Gajdošíkovi za pomoc s českým jazykem a gramatikou.

Abstrakt

Hlavním cílem mé bakalářské práce bylo navrhnout simulátor pro metalická vedení pro technologii ADSL a standardní telefonní linky. Umělé vedení (simulator) napodobuje různé délky a útlumové charakteristiky reálných kabelů. První část práce se zabývá obecným teoretickým rozбором charakteristik metalických vedení na bázi symetrického vedení. Druhá část je návrh umělého vedení a jeho základních vlastností. Třetí část se zabývá měřením útlumu v reálných vedení a realizovaného umělého vedení.

klíčová slova

ADSL, umělé vedení, symetrický kabel, útlumové charakteristiky, metalická vedení, činitel stojatých vln, Primární parametry, sekundární parametry, Přenosové médium, impedance vedení.

Abstract

The main purpose of my baccalaureate work was to design metallic lines simulator for ADSL technology and standard telephone lines, which simulates different lengths and attenuation characteristics in real cables. The first part deal with general theoretical ideas about metallic lines characteristics based on symmetric cables. The second part is about design methods and basic characteristics of the artificial transmission line and the third part analyse and design methodology with simulations, attenuation measurements in real cables and artificial transmission line.

Key words

ADSL, artificial transmission line, symmetric cable, attenuation characteristics, metallic lines, Standing Waves Ratio, primary parameters, secondary parameters, transmission medium, impedance.

Seznam použitých symbolů a zkratek

$H(j\omega)$	frekvenční charakteristika	[Hz]
ω_{\max}	úhlová frekvence	[rad/s]
f_{\max}	nejvyšší frekvence přenášeného pásma	[Hz]
Z_c	modul vlnové impedance	[Ω]
Z_k	impadance nakrátko vedení	[Ω]
Z_p	impedance naprázdno vedení	[Ω]
γ	měrná vlnová míra přenosu	
η	rozdíl impedancí nakrátko a naprázdno vedení	
λ	konstanta vlnové délky vedení	[km]
α	Měrný (vlnový) útlum	[dB/km]
β	měrný fázový posuv	[rad/km]
l	delká vedení	[m]
ζ_0	číslo komplexní a bezprostředně závisí na měrném útlumu a posuvu	
n	počet segmentů	
k_0	koeficient odrazu	

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Metalické vedení	2
2.1	Struktura a charakteristika symetrického kabelu	3
2.2	Primární parametry	6
2.3	Sekundární parametry	7
2.4	Impedančně přizpůsobené vedení.....	8
2.5	Útlum metalických kabelů	9
3	Modely vedení	11
3.1	Kaskáda n dvojbranů	12
3.2	Jeden dvojbran.....	15
4	Návrh umělého vedení.....	18
4.1	Experimentální metody návrhu	18
4.2	Vlastní návrh umělého vedení	20
4.3	Měření reálných kabelů a umělého vedení.....	25
5	Závěr	32
	Literatura.....	33

1 Úvod

Přenosové médium pro telekomunikační systém a jeho vlastnosti při šíření signálu jsou plně charakterizovány teorií přenosových vedení. Přenosové vedení lze tedy zkoumat na základě teorie obvodů, kde pracujeme s proudem a napětím. Přenosové vedení se v různých variantách vyskytují v nejrůznějších aplikacích, avšak, bez ohledu na typ, délku, či konstrukci pracují všechny na stejných principech. Účastnická vedení v přístupové části telekomunikační sítě původně sloužila pouze pro přenos telefonního hovorového signálu v pásmu 300 Hz až 3,4 kHz. V dnešní době jsou však používána pro stále vyšší a vyšší kmitočtová pásma, digitální účastnické přípojky DSL (Digital Subscriber Line) využívají frekvenční pásmo v řádech MHz. Cílem popisovaného zkoumání byla konstrukce umělého vedení (UV) simulujícího účastnické vedení pro přípojky DSL (Digital Subscriber Line), zejména pak pro přípojky ADSL (Asymmetric DSL). Vzal jsem tuto skutečnost v úvahu pro návrh umělého vedení do 1 MHz. S ohledem na tyto a další zadané požadavky byl zkoumán návrh známou metodou umělého vedení, která je popsána v celé této práci, a také jsem použil experimentální metody, které byly provedeny na realizovaném modelu umělého vedení pro digitální účastnickou linku.

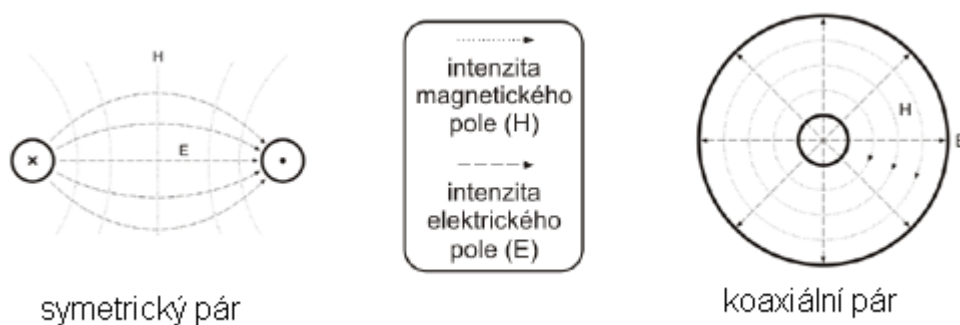
V teoretické části je provedena analýza metalického vedení podle klasické teorie jako nesymetrického vedení. Návrh umělého vedení je proveden jako symetrický dvojbran. V práci jsou prezentovány tabulky a grafy analyzovaných veličin. Následně v praktické části bylo provedeno řešení reálných praktických problémů, jako je odstraňování potíží, simulace a měření reálného vedení a realizovaného umělého vedení.

2 Metalické vedení

Při přenosu zprávy je zpráva přeměněna na signál. Signálem je zpráva přeměněna do konkrétní fyzikální formy, která je vhodná pro přenos určitým prostředím.

Metalické vedení je Měděné cesty přenosu jsou prováděny telekomunikačních linky, který jsou vhodně uspořádány měděných vedení. Přenášejí s signály, signály s velmi nízkými, tónovými i vysokými kmitočty.

Pro přenos elektrických signálů se používá nadzemních vedení a kabelových vedení. kabelová vedení jsou realizována buď pomocí závěsného kabelu, který je zavěšen nad zemí na podpěrách (podobně jako nadzemní vedení), nebo, a to nejčastěji, pomocí úložných kabelů umístěných v zemi. Obr. 1 ukazuje symetrický pár a koaxiální pár vedení a jejich charakteristika, intenzita magnetického pole (H) a intenzita elektrického pole (E).



Obrázek 1: zobrazuje Uspořádání vodičů

2.1 Struktura a charakteristika symetrického kabelu

Jádro používané materiály Cu(dříve bylo Al- špatné mechanické vlastnosti).

Výroba :

- zpracování měděných katod na bezkyslíkatý měděný drát
- tažení přes průvlaková očka, až na požadovaný průměr, poslední očko je diamantové a kalibrované (přesnost na 0.001 mm).

Žíla:

- jádro s izolací buď papírovou nebo styroflexovou (PE izolace je příliš tlustá, proto se nepoužívá pro dálková vedení, výjimka: pěnový PE – vznik vzduchových bublinek)- dálkové kabely, PVC- PE - místní kabely
- podstatou papírové izolace je provázek navinutý do spirály na jádro a přes něj namotaný papírový pásek (suchý vzduch velmi dobrý izolant), obdobně styroflexová izolace.

Kabelová duše je vzniká stáčením prvků (prvek vzniká stáčením jednotlivých žil do párů nebo čtyřek) a stáčení buď koncentrické nebo skupinové.

- koncentrické stáčení -prvky se stáčejí v protisměrných vrstvách .
- skupinové stáčení -1 skupina nejčastěji 25,50,100 párů
- pro digitální systémy - stíněné skupiny (např. po 7 párech)

Plášť:

- slouží k ochraně kabelové duše
- většinou se používá jako materiál olovo (Pb), které se leguje pro zlepšení parametrů antimonem (Sb)
- alternativou je hliníkový plášť (Al vyšší vodivost než Pb - stínící účinky)

- jako ochrana proti vlhkosti (způsobuje korozi) bitumen nebo plast, proti poškození pancéřové opláštění.

Charakteristika symetrického kabelu

dvojice paralelních nebo spirálově stočených vodičů v kabelu a jejich vodiče mají proti zemi stejnou impedanci (elektrická symetrie vůči zemi). Význam minimalizace proti rušení (minimální indukce), nízkofrekvenční (místní spojovací kabely) a vysokofrekvenční (nosné dálkové kabely).

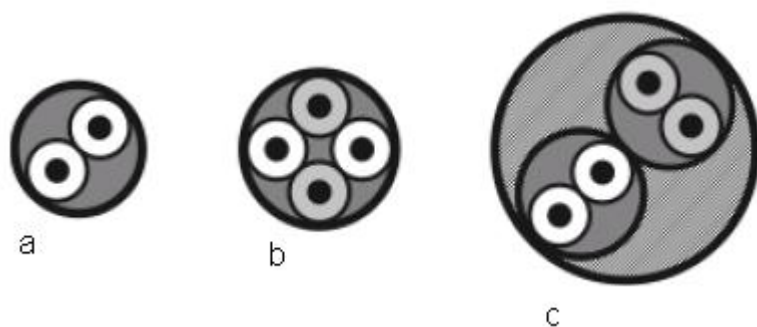
Nadzemní vedení dříve pro přenos signálů v pásmu od 0-150 kHz (rozhlas po drátu), malokanálové nosné systémy (3+3, 12+12) a realizovány bronzovými, bimetalickými (ocelová duše, měděný nebo hliníkový povlak) nebo ocelovými vodiči o průměru 2-4 mm

nevýhoda:

- závislost na klimatických podmínkách
- velká spotřeba materiálu v současnosti využití VVN vedení pro přenos signálů dálkového ovládání a signalizace (energetické dispečinky, pásmo 30kHz-700kHz).

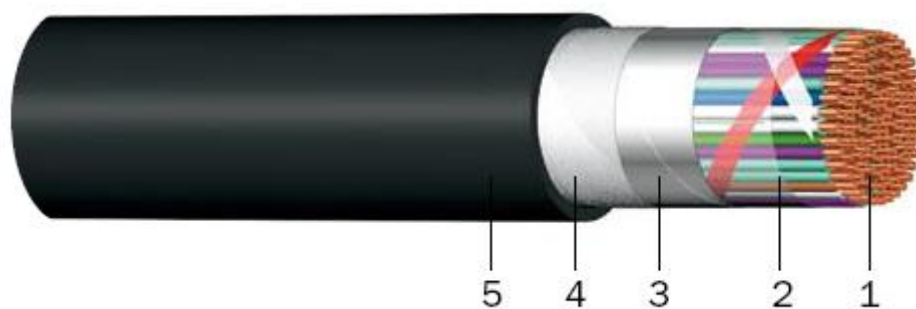
Strukturovaná kabeláž:

- kategorie CAT5 (příp. 5E) – do 100MHz (100Mbit/s)
- kategorie CAT6 (do 250MHz)
- kategorie CAT7 (do 600MH



Obrázek 2: Typy Symetrických prvků

Nejčastějšími symetrickými prvky kabelu jsou pár (obr.2a), křížová čtyřka X (obr.2b) nebo tzv. DM čtyřka, která vzniká stočením dvou párů (obr.2c).



Obrázek 3 : TCEPKPFLE KABEL

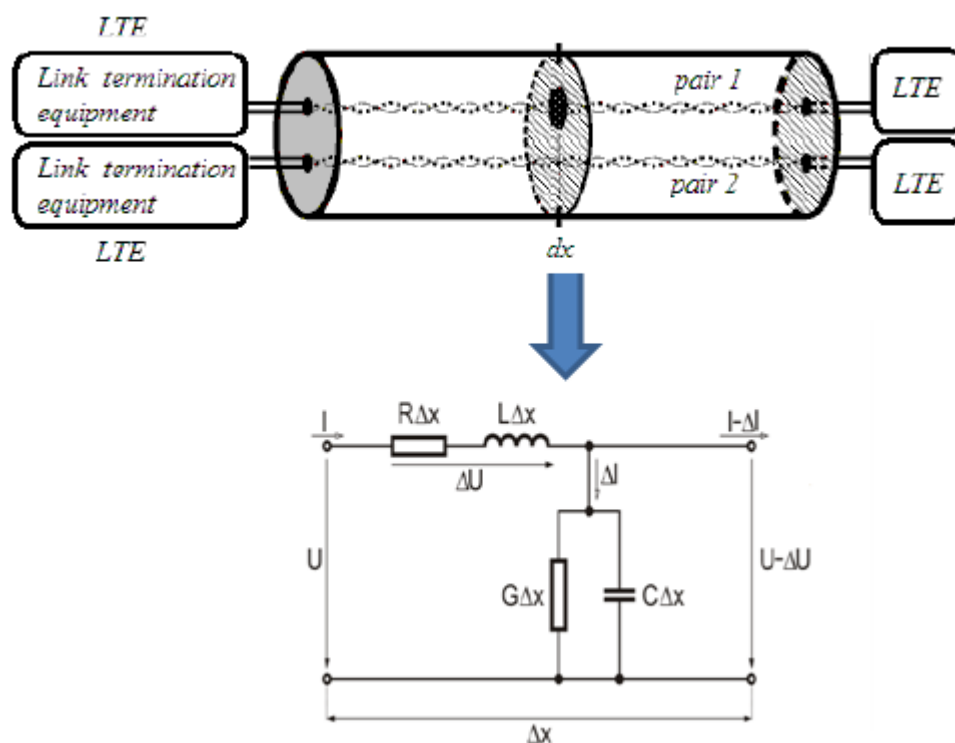
Konstrukce:

1. Cu jádro
2. Izolace (foam-skin PE), žíly jsou stočené do čtyřek a pětičtyřkových skupin, pětičtyřkové skupiny stočeny do duše kabelu a naplněné vodoblokující hmotou
3. Obal (separační páska)
4. Stínění (PE Al PE páska)
5. Plášť (PE černý, odolný proti UV záření)

Kabely jsou vodotěsné a určeny pro vnější telekomunikační sítě

uložené do země, kabelových kanálů nebo do trubek.

2.2 Primární parametry



Obrázek 4: Náhradní schéma element homogenního vedení

Primární vedení jsou konstanty parametry, které popisují vlastnosti mědi (nebo jiný vodivý materiál), přenosová vedení, pokud jde o fyzikální elektrické vlastnosti vedení. Primární parametry jsou relevantní pouze pro metalické spoje a mají být v kontrastu s sekundární parametry. Čtyři základní primární parametry::

- Měrný odpor R (Ω/km)
- měrná indukčnost L (mH/km)
- měrná kapacita C (nF/km)
- měrný svod G ($\mu\text{S}/\text{km}$).

Pro daný typ vedení a danou frekvenci jsou to konstanty. Vedení parametry nemůže být představovat jako soustředěná prvky v obvodu, ale musí být popsán jako distribuované prvky. Při přenosu harmonického signálu vedením dochází průchodem proudu I podélnou impedancí element k úbytku napětí.

$$\Delta U = I(R + j\omega L) \quad (2.1)$$

příčna větev pak způsobuje úbytek proudu:

$$\Delta I = U(G + j\omega C) \quad (2.2)$$

Pro sledování přenosových vlastností homogenního vedení se zavádějí **sekundární parametry vedení**.

2.3 Sekundární parametry

Poměr U a I je v každém bodě homogenního vedení stálý a nazývá se charakteristická (vlnová) impedance vedení Z_c .

$$Z_c = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} = |Z_c| \cdot e^{j\varphi_c} \quad (2.3)$$

kde $|Z_c|$ je modul vlnové impedance neboli absolutní hodnota vlnové impedance, který udává poměr velikosti napěťové a proudové vlny v každém místě homogenního vedení, **Vlnová impedance** nezávisí na frekvenci signálu, ani na délce vedení. φ_c je argument vlnové impedance, který udává rozdíl mezi fází napěťové a proudové vlny v každém místě homogenního vedení.

Relativní změna napětí a proudu v každém elementu vedení vztažená na jednotkovou délku vedení je také konstantní a nazývá se **měrná vlnová míra přenosu**.

$$\gamma = \frac{\Delta U}{U \cdot \Delta x} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (2.4)$$

Kde α je měrný útlum (dB/km) a β je měrný fázový posun (rad/km). β udává zpoždění vlny na jednotku délky. Zpoždění fáze o $360^\circ (2\pi)$ nastane ve vzdálenosti jedné délky vlny λ , tj.

$$B\lambda = 2\pi \quad (2.5)$$

a tudíž

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta}. \quad (2.6)$$

Fázový posuv je často prezentovaný v literatuře jako **konstanta šíření** – jeho hodnota závisí na typu vedení a jeho vlastnosti.

2.4 Impedančně přizpůsobené vedení

V telekomunikacích, návrat odrazu nebo odraz vedení je návrat signálu moci vyplývající z reflexe způsobil na diskontinuita v přenosové vedení nebo optické vlákno. Tato diskontinuita může být nesoulad s ukončení zátěže nebo zařízení vložené v řadě. To je obvykle vyjádřeno jako poměr v decibelech (dB).

Správnost impedance shoda je vyjádřena pomocí **koeficient odrazu**

$$K_0 = \left| \frac{Z_2 - Z_c}{Z_2 + Z_c} \right| \quad (2.7)$$

Kde Z_2 je impedance na konci vedení a Z_c charakteristická impedance. Útlum odrazu v důsledku nevhodného přizpůsobení je:

$$A_{K_0} = 20 \cdot \log \frac{1}{K_0} = 20 \cdot \log \left| \frac{Z_2 - Z_c}{Z_2 + Z_c} \right| [\text{dB}] \quad (2.8)$$

Správnost impedančního ukončení může být vyjádřena poměrem maximální a minimální amplitudy stojatých vln (stojaté vlnění Ratio):

$$SWR = \frac{1 + K_0}{1 - K_0} \quad (2.9)$$

2.5 Útlum metalických kabelů

Útlum je základním parametrem symetrického vedení a vyjadřuje schopnost přenosového média přenést signál představovaný elektrickým výkonem ze vstupu na výstup. Nejdůležitějším parametrem, který ovlivňuje přenos dat je útlum vedení, která omezuje dosah DSL digitální technologie.

$$A = l \cdot \alpha [dB] \quad (2.10)$$

Kde α je útlum koeficient specifické pro každý materiál, a l je délka vedení. Útlum vyjadřuje schopnost přenosového média pro přenášet signál od začátku vedení až na konec.

$$A = 10 \log \left| \frac{P_1}{P_2} \right| [dB] \quad (2.11)$$

Kde P_1 je výkon na vstupu vedení a P_2 na výstupu vedení. Často se vyjadřuje měrný útlum vedení, který představuje útlum vztažený na jednotku délky l v [km].

Před měřením útlumu je třeba provést kalibraci, při níž se změří celkový útlum symetrizačních transformátorů při propojení svorek krátkými propojkami v celém frekvenčním pásmu a zaznamená se pro účely korekce naměřených hodnot. Analyzátoři mají obvykle funkci kalibrace a následné korekce měřených hodnot přímo implementovanou. Po kalibraci se krátké propojky nahradí měřeným párem a proměří se závislost útlumu na frekvenci v celém požadovaném kmitočtovém pásmu.

Parametry konkrétních typů symetrických párů lze získat měřením, avšak pro postihnutí základních charakteristik a pro simulaci chování systémů instalovaných na metalické přípojky je účelné definovat funkce, které modelují vlastnosti měřených párů. Je možné přímo modelovat měřené sekundární parametry, nebo modelovat primární parametry. Model kmitočtových závislostí parametrů může být také koncipován jen pro určité omezené kmitočtové pásmo a omezenou přesnost.

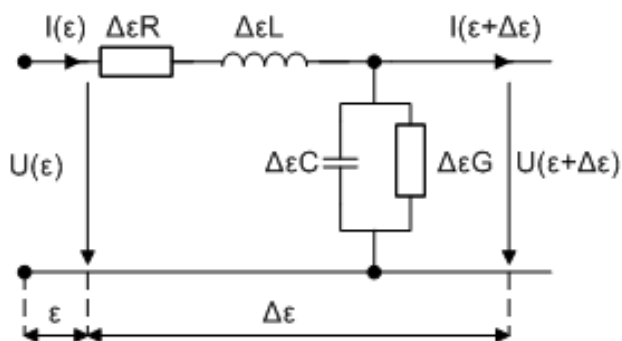
Pro přímé modelování sekundárních parametrů lze použít mocninnou řadu. Měrný útlum se dá zjednodušeně modelovat funkcí s jedním parametrem k_α a závislostí na odmocnině frekvence.

$$\alpha_{(f)} = k_\alpha \sqrt{f} \left[\frac{dB}{km} \right] \quad (2.12)$$

Odkud je pak možné určit útlum

$$A_f = \alpha_{(f)} \cdot l [dB] \quad (2.13)$$

3 Modely vedení

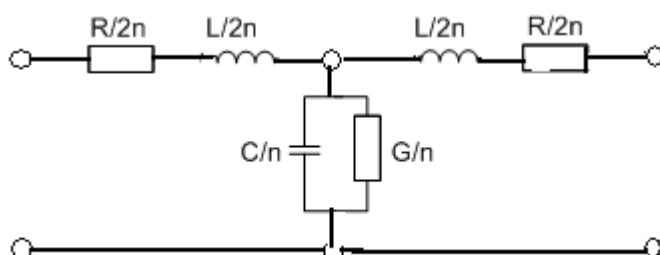


Obrázek 5: vlastnosti symetrických párů

Přenosové vedení je obvodem s rozprostřenými parametry, tj. jeho obvodové veličiny jsou kromě času také funkcemi prostorových souřadnic a probíhající děje mají vlnový charakter. Elektrické vlastnosti symetrických párů jsou definovány s využitím klasického modelu přenosového vedení. Přijmeme-li předpoklad, že vedení je homogenní (vedení s konstantním průměrem a zkrutem po celé jeho délce), tj. uvedené diferenciální parametry jsou po celé délce vedení konstantní, můžeme zavést primární parametry – R , L , C a G jakožto veličiny měrné. Tyto parametry jsou závislé na frekvenci, teplotě a vlhkosti. Pro většinu simulací či modelů je vliv frekvence zásadní. Vliv frekvence má za následek různé hodnoty těchto parametrů pro různé frekvence. Obr.4 zobrazuje segmentu přenosového vedení. Primární parametry vedení mohou být použity k výpočtu sekundárních parametrů vedení, jedná se o charakteristickou impedanci Z_0 a měrnou míru přenosu γ , kde reálnou a imaginární částí měrné míry přenosu jsou funkce útlumu α [Np/km resp. dB/km] a fázového posuvu (zkreslení) β [rad/km].

Umělé vedení je dvoubrany elektrické obvody, které mají přenosové vlastnosti skutečné přenosové vedení, a proto mohou simulovat reálné vedení. T modelů se soustředěnými parametry nevede k požadovaným výsledkům. Nicméně mohou být tyto modely použity pro analýzu vedení jak v časové, tak ve frekvenční oblasti.

3.1 Kaskáda n dvojbranů



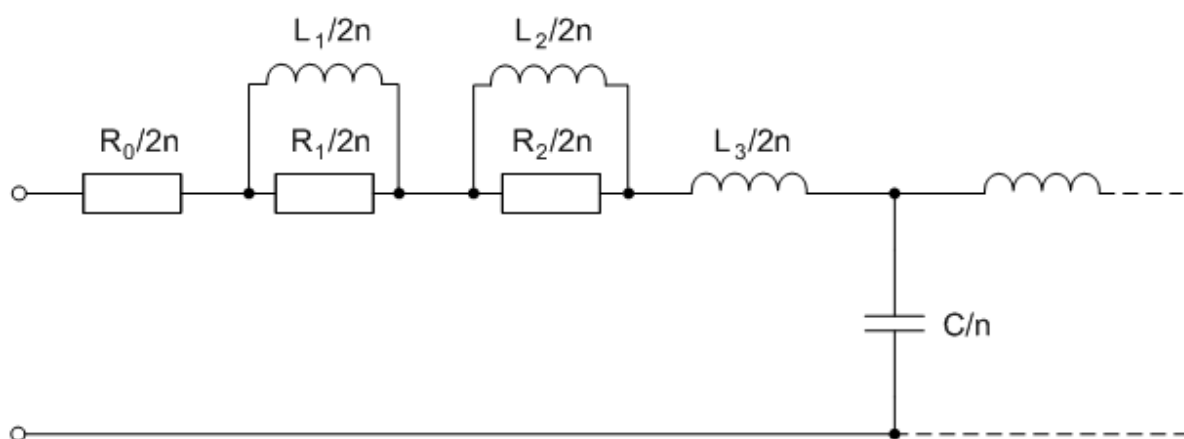
Obrázek 6: zapojení homogenního vedení délky $l = 1/n$ (km)

Při návrhu umělého vedení je třeba sledovat dvě hlavní hlediska:

potřebný počet segmentů pro dosažení požadované přesnosti a frekvenční závislost primárních parametrů, která se musí projevit v konstrukci každého segmentu.

Obvodové prvky zastupující poměrnou část hodnoty primárního parametru musí být nahrazeny náhradním obvodem, který modeluje i jejich frekvenční závislost. Výsledek je kompromisem mezi složitostí takového obvodu a jeho věrností vypočtenému originálu. Frekvenční závislost měrného odporu (prvku $R/2n$) je vlivem povrchového jevu ve sledovaných podmínkách pravděpodobně nejvýraznější. Je zřejmé, že v náhradním zapojení měrného odporu musí být použity i reaktanční prvky, takže výsledná impedance tohoto zapojení nebude čistě reálná. V určitém rozsahu lze frekvenční závislost měrného odporu vyjádřit jako odmocninu z frekvence. Z požadovaného průběhu měrného odporu je zřejmé, že impedance funkce bude mít póly i nuly v nekonečnu a můžeme vycházet z kanonického zapojení RL členů, hodnoty součástek. Musíme vzít na vědomí, že zapojením reaktančních prvků do obvodu imitujícího reálnou impedanci ztrácíme souvislost mezi úhlem přenosu skutečného vedení a obrazovým úhlem

přenosu konstruovaného umělého vedení. Na modulu impedance RL dvojpólu se vliv frekvenční závislosti měrné indukčnosti projeví mnohem více, než vliv závislosti měrného odporu. Nabízí se proto řešení vytvořit náhradní zapojení nikoli každého primárního parametru zvlášť, ale přímo sériového spojení prvků $R/2n$ a $L/2n$. Vložením tohoto zapojení do segmentu vedení vznikne následující schéma, které je zobrazeno na Obr.7



Obrázek 7: Modifikovaný segment vedení

A jeho impedanci je možno vyjádřit jako:

$$Z(f) = R_0 + \frac{R_1 \cdot j2\pi L_1}{R_1 + j2\pi L_1} + \frac{R_2 \cdot j2\pi L_2}{R_2 + j2\pi L_2} + j2\pi L_3 \quad (3.1)$$

Nelineární regresí zjistit hodnoty součástek tak, abychom došli k impedanci vypočtené z modelu BT#1, která má tvar:

$$Z(f) = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt[4]{r_{0c}^4 + a_c f^2}} + \frac{1}{\sqrt[4]{r_{0s}^4 + a_s f^2}}} + j \cdot 2\pi \cdot f \cdot \frac{l_0 + l_\infty \left(\frac{f}{f_m}\right)^b}{1 + \left(\frac{f}{f_m}\right)^b} \quad (3.2)$$

Vlastní aproximace ukázala, že z náhradního schématu RL dvojpólu je možno vypustit induktor L_3 , který původně zastupoval měrnou indukčnost, neboť ta je dostatečně reprezentována

induktory L_1 a L_2 . Tato konstrukce umělého vedení je ve své podstatě velmi jednoduchá. Vychází z primárních parametrů skutečného vedení R , G , L , C a přípustných odchylek impedance či míry přenosu. Poměrná odchylka obrazové impedance od vlnové impedance skutečného vedení je po úpravách dána vztahem:

$$\zeta_0 = \frac{r^2}{8n^2} \quad (3.3)$$

odchylka ζ_0 je číslo komplexní a bezprostředně závisí na měrném útlumu a posuvu nahrazovaného vedení a na počtu čtyřpólů n . Z této rovnice lze odvodit vztah pro určení potřebného počtu segmentů:

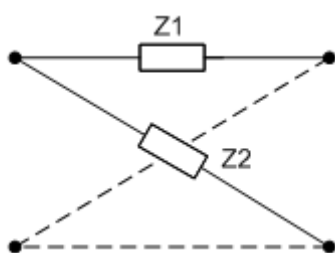
$$n = \frac{\omega_{max}}{2} \sqrt{\frac{LC}{2|\zeta_0|}} \quad (3.4)$$

$\omega_{max} = 2\pi f_{max}$ je úhlová frekvence

kde f_{max} je nejvyšší frekvence přenášeného pásma. Poměrná.

Pomocí této návrhové metody by tedy bylo umělé vedení, pro přípojku ADSL o délce 1 km s horní mezní frekvencí 1 MHz. Je-li ovšem každý segment upraven tak, aby respektoval frekvenční závislost primárních parametrů, potřebný počet segmentů pro zvolené pásmo podstatně roste.

3.2 Jeden dvojbran



(3.5)

Obrázek 8: zapojení křížového článku

Zcela odlišný způsob konstrukce umělého vedení je založen na náhradě skutečného vedení délky l (km) dokonale souměrným křížovým článkem. Tato metoda je založena na aplikaci Barlettova teorému, podle kterého je možno každý příčně i podélně souměrný dvojbran nahradit zapojením dokonale souměrného křížového článku.

Podélná impedance Z_1 odpovídá impedanci nakrátko vedení poloviční délky, vzhledem k vedení modelovanému, a podobně diagonální impedance Z_2 odpovídá impedanci naprázdno vedení poloviční délky.

S úspěchem bude touto metodou zkonstruováno umělé vedení tehdy, jestliže se podaří nalézt zapojení, jejichž impedance odpovídá impedanci naprázdno a nakrátko poloviční délky modelovaného vedení v zadaném frekvenčním rozsahu. Zapojení dokonale souměrného křížového článku je na Obr. 8

Jeho impedance naprázdno a nakrátko jsou dány rovnicemi:

$$Z_P = \frac{1}{2}(Z_1 + Z_2) = Z_0 \cot gh(\gamma l) \quad (3.6)$$

$$Z_K = 2 \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = Z_0 \operatorname{tgh}(\gamma l) \quad (3.7)$$

Obrazová impedance je dána vztahem:

$$Z_0 = \sqrt{Z_K Z_P} = \sqrt{Z_1 Z_2} \quad (3.8)$$

obrazovou míru přenosu lze vyjádřit jako:

$$\operatorname{tgh} \frac{\theta_0}{2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \quad (3.9)$$

Křížový článek je ekvivalentem homogenního vedení délky l (km). Poté lze tedy řešit rovnice postupným rozvojem v řetězový zlomek. Podle řetězových zlomků poté sestavíme řetězové dvojpóly, které realizují jejich impedance. Oba řetězové zlomky i řetězové dvojpóly mají nekonečný počet členů.

V praxi se ovšem musíme spokojit s konečným počtem členů a tím vzniknou odchylky mezi zadanou a aproximující funkcí. Pro tento způsob konstrukce umělého vedení podstatné, aby se obě impedance významně lišily. Rozdíl obou impedancí je dána:

$$Z_{V1P} - Z_{V1K} = Z_0 \left(\tanh(\gamma \cdot l) - \frac{1}{\tanh(\gamma \cdot l)} \right) = Z_0 (\tanh(\gamma \cdot l) - \operatorname{cotgh}(\gamma \cdot l)) \quad (3.10)$$

Vztáhneme-li tento rozdíl k hodnotě charakteristické impedance, bude tato poměrná odchylka činit:

$$\eta = (\tanh(\gamma \cdot l) - \operatorname{cotgh}(\gamma \cdot l)) \quad (3.11)$$

Zkracováním délky vedení rozšiřujeme frekvenční pásmo, ve kterém je rozdíl impedancí nakrátko a naprázdno takový, že umožňuje konstrukci umělého vedení pomocí této metody. Nabízí se tedy možnost zkonstruovat umělé vedení pro kratší úseky vedení, a následně jejich kaskádním spojením realizovat vlastnosti vedení požadované délky. Zde ovšem narážíme na

další omezení této metody, kterým je požadavek na snadnou realizovatelnost impedančních funkcí. Prvním omezujícím faktorem je útlum vedení, který závisí na primárních parametrech a délce vedení. Čím vyšší je jeho hodnota, tím menší je rozdíl impedance naprázdno a nakrátko a tím vyšší požadavky na přesnost aproximace. Druhým omezujícím faktorem je realizovatelnost impedanční funkce, tj. omezení na takové frekvenční pásmo, při kterém nenastane rovnost mezi délkou vedení a čtvrtinou vlnové délky. Z principu této metody ovšem nevyplývá podmínka, aby délka vedení byla menší než čtvrtina vlnové délky.

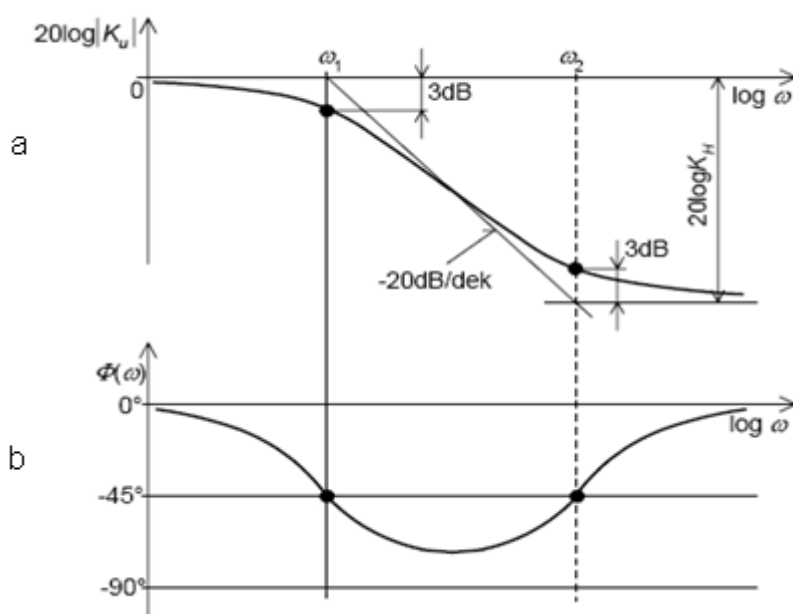
4 Návrh umělého vedení

4.1 Experimentální metody návrhu

Za účelem volby co nejjednoduššího obvodu jsem zvolil dolní propust typu RC se sériově řazeným odporem a kapacitorem, označovaný v literatuře jako pasivní PI-regulátor. Je charakterizován dvěma úhlovými rychlostmi ω_1 a ω_2 , které představují zlomy frekvenční charakteristiky.

$$\omega_1 = \frac{1}{(R_1 + R_2)C} \quad (4.1)$$

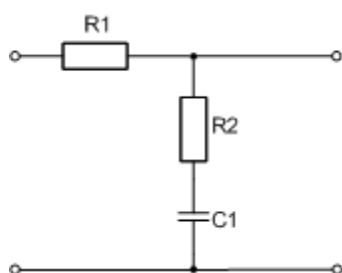
$$\omega_2 = \frac{1}{R_2 C} \quad (4.2)$$



Obrázek 9: a) Modulová a b) fázová charakteristika PI-regulátoru

Jeho frekvenční charakteristika je dána vztahem:

$$H(j\omega) = \frac{1 + \frac{j\omega}{\omega_2}}{1 + \frac{j\omega}{\omega_1}} \quad (4.3)$$



Obrázek 10: Základní struktura pasivního PI-regulátoru

Pro použití v segmentu umělého vedení má tento obvod významnou vlastnost, a sice v pásmu vyšším než ω_2 vykazuje konstantní útlum a nulový fázový posun. Bude-li umělé vedení, jež je tvořeno několika takovými segmenty, optimalizováno pro určité frekvenční pásmo, bude při jeho překročení vykazovat nižší útlum, než vedení skutečné. Pro rozšíření požadovaného frekvenčního pásma je možno připojit další článek s vhodnými parametry.

4.2 Vlastní návrh umělého vedení

Základním kamenem návrhu je kaskádní spojení obvodů pasivních PI-regulátorů a využívání vlastností jejich frekvenčních charakteristik (zlomových bodů). V kmitočtové rovině je chování obvodu plně popsáno úhlovými

frekvencemi ω_1 a ω_2 . Úhlová frekvence ω_1 určuje mez propustného pásma a ω_2 spodní hranici konstantního útlumu, jejich poměr pak udává maximální útlum článku. Z hodnot součástek stanovených regresní analýzou můžeme stanovit obě úhlové frekvence pro uvažované články. Potřebný počet kaskádně spojených článků se bude řídit celkovým útlumem vedení a nikoli pouze horní hranicí frekvenčního pásma. Za účelem dosažení přesnějších hodnot útlumu na vyšších frekvencích lze připojit na konec kaskádního spojení další článek, jež by se staral o aproximaci hodnot útlumu vedení v tomto horním frekvenčním pásmu.

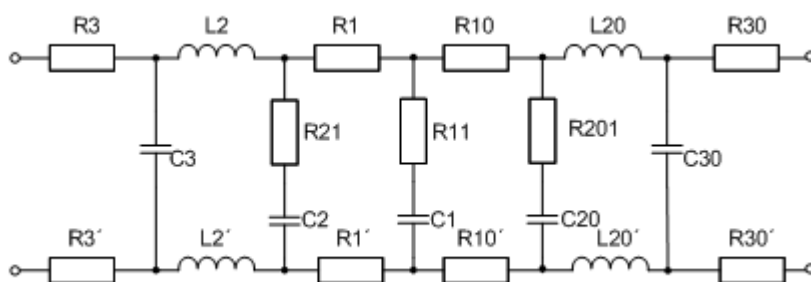
dvě varianty:

- RC dolní propust (menší strmost útlumové charakteristiky na vysokých a frekvencích)
- LC dolní propust (vyšší strmost na vyšších frekvencích).

Metoda stanovení parametrů (tj. hodnot součástek) umělého vedení je založena na snaze dosáhnout metodou nejmenších čtverců co nejlepší shody napětí na výstupní impedanci se stejnou hodnotou skutečného vedení (modelovaného podle BT#1). Nepřesnost použité metody je v předpokladu, že odchylka charakteristické impedance vedení od jeho skutečného zakončení bude mít za následek stejnou odchylku modulu útlumu u skutečného (modelovaného) a umělého vedení. Pro zjednodušení předpokládáme, v průběhu návrhu umělého vedení pro přípojky ADSL resp. Skutečnost, že v praxi je vedení buzeno z obou stran, vyžaduje jeho příčnou symetrizaci. Tu můžeme provést přidáním zrcadlově obráceného obvodu k původnímu umělému vedení. Je třeba ovšem vzít v potaz, že jsme zdvojnásobili nejen počet součástek, ale i řád jednotlivých útlumových článků. Proto stejných vlastností jako u nesymetrizovaného umělého vedení nedosáhneme ani prostým přepočtem hodnot součástek, ani jejich stanovením

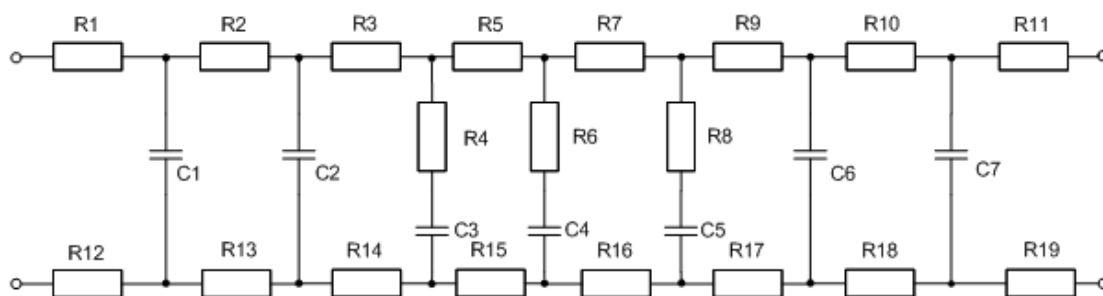
regresní analýzou. Umělé vedení je proto zapotřebí navrhnout znovu na základě zkušeností získaných při předchozích výpočtech, tj.: obvod bude navrhován jako symetrický od středu k okrajům a útlumové články budou progresivní, tj. se bude zvyšovat jejich řád.

Pro co možná nejmenší ovlivnění vstupní impedance je třeba obvod ještě modifikovat, a to přesunutím indukčností směrem ke středu obvodu. Dále je, vzhledem k aplikaci obvodu, také nutné obvod podélně symetrizovat tak, aby byl signál procházející jednou větví ovlivněn úplně stejně jako signál procházející větví druhou, stejně jako je tomu v případě skutečného vedení. Struktura umělého vedení respektující tyto úvahy je zobrazena na Obr. 3, kde uprostřed zapojení se nachází T článek 1. řádu, poté následují z obou stran útlumové články 1. řádu, které dohromady tvoří článek 2. řádu (jsou realizovány shodnými součástkami), na závěr je obvod na obou stranách doplněn o útlumové články 2. řádu, které dohromady tvoří článek 4. řádu.

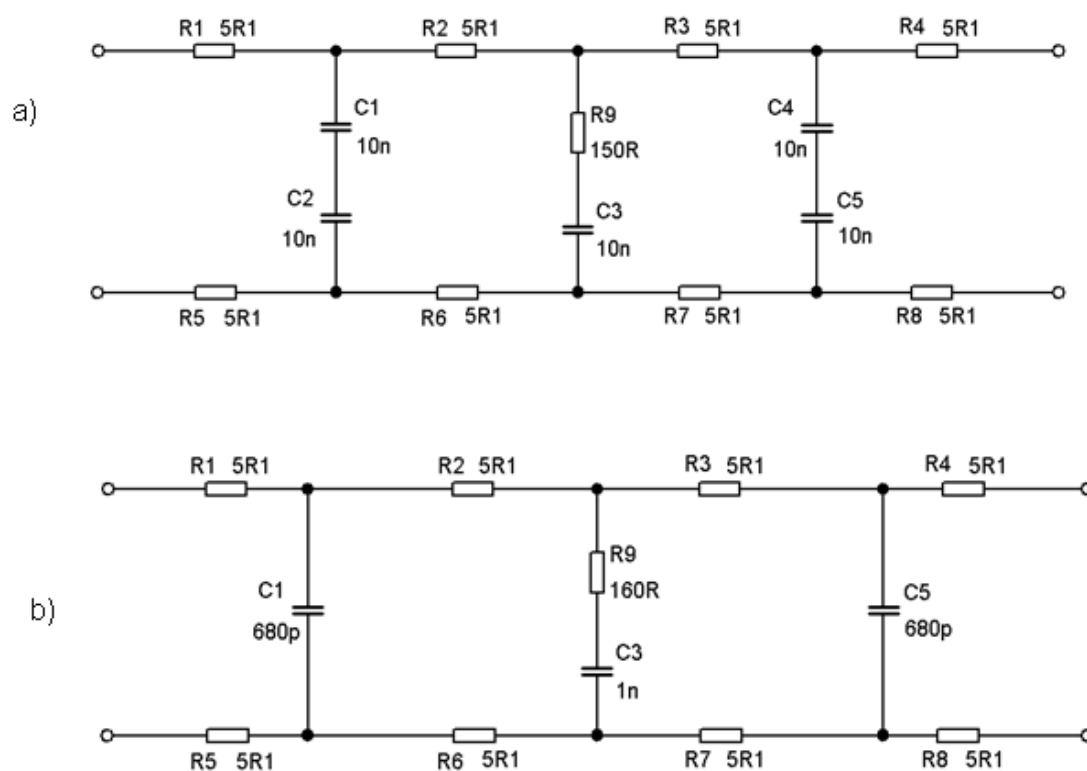


Obrázek 11: Symetrická varianta umělého vedení

Avšak model umělého vedení, který obsahuje indukčnosti, sice respektuje průběh útlumu s uspokojivou přesností až do vysokých frekvencí, nicméně vlastní indukčnosti se začnou negativně projevovat při zapojení obvodu do přenosové cesty s modemy ADSL. Modemy obsahují časové korektory TEQ (Time Domain Equalizer), jež zapojené indukčnosti natolik ovlivňují, že DSL spojení přes toto umělé vedení dosahuje značně nižších hodnot přenosových rychlostí než je tomu přes skutečné vedení odpovídající délky. Proto je nutné přece jen k pokrytí vyšších frekvencí využít dodatečných RC článků. Takováto struktura umělého vedení je uvedena na Obr.12 a 13

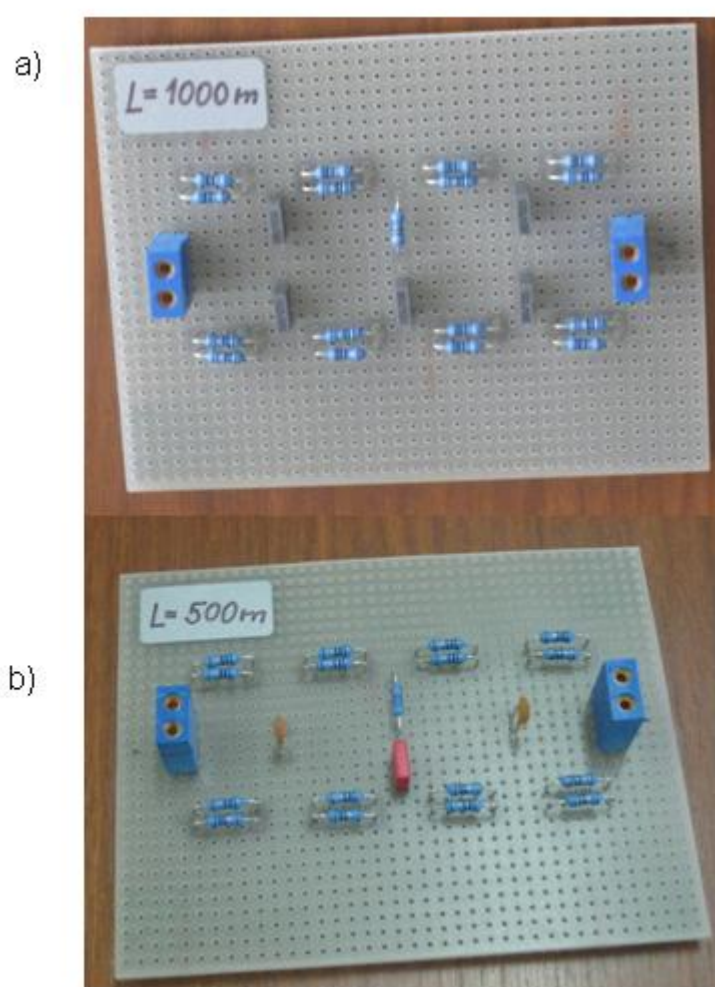


Obrázek 12: Struktura umělého vedení bez indukčností



Obrázek 13: Struktura umělého vedení bez indukčností a) pro 1000m a b) 500m

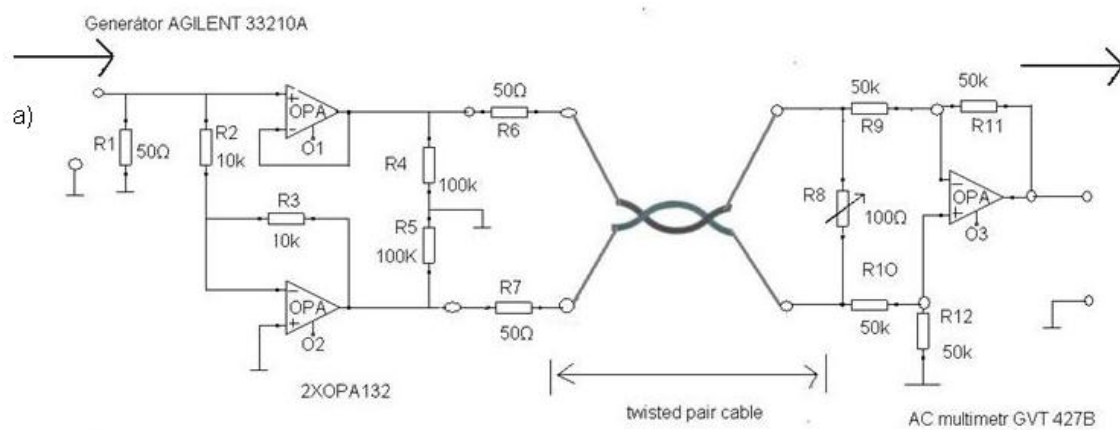
Pro provedení analýzy navrženého umělého vedení, byl model vedení fyzicky realizován a podroben detailním měřením jednotlivých parametrů přenosových vedení. Součástí realizační fáze bylo stanovení hodnot součástek umělého vedení s vlastnostmi konkrétního symetrického páru zvolených délek např. pro 1000m a 500m. Pro co možná nejpřesnější komparaci modelů, byl zvolen typ metalického vedení, který je dostupný v prostředí laboratoře katedry telekomunikační techniky. Jedná se o místní čtyřřádkový kabel typu TCEPKPFLE 75x4x0,4 mm (Prakab). Realizovaný modul umělého vedení je uveden na Obr.14



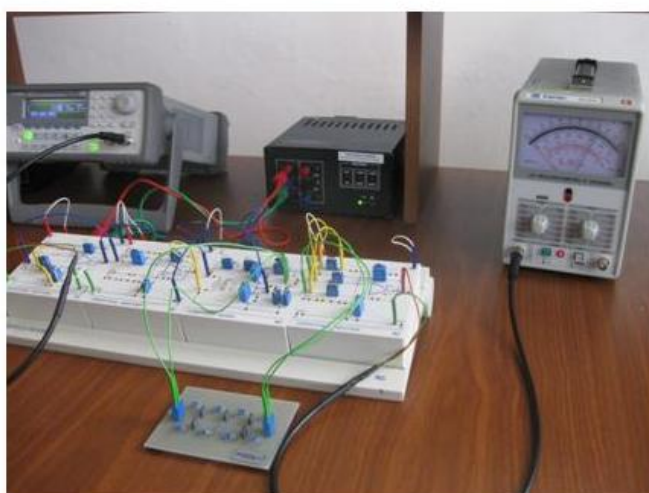
Obrázek 14: Konečná symetrická varianta umělého vedení délky a) 1000m a b) 500m

Umělá vedení byla navrhována pro jejich aplikaci v přenosové cestě přípojky ADSL. Změřené parametry jsou uvedeny v Tab. 1 a 2. Parametry umělého vedení odpovídají modelovaným parametrům. Součástí analýzy bylo samozřejmě také srovnání změřených průběhů útlumových charakteristik s průběhy simulací a s průběhy parametrů reálných vedení, kde výsledky měření potvrdily předpoklady s velmi uspokojivou přesností.

4.3 Měření reálných kabelů a umělého vedení



b)



Obrázek 15: a) ukazuje schema zapojení a b) ukazuje měřicí pracoviště

Tabulky naměřených hodnoty

f[kHz]	Přenos G[dB]		
	Reálný kabel. Měření A[dB]	Simulace SNAP G[dB]	Umělé vedení .měření A[dB]
20	9,3	-7,8	8
40	10	-8,3	8,5
60	11	-8,9	9
80	11,7	-9,4	9,5
100	12,2	-9,9	10,2
200	13,8	-11,5	11,6
400	17,7	-13,9	14,1
600	21	-16	16,9
800	20,8	-18	18,9
1000	23,8	-19,7	19,7

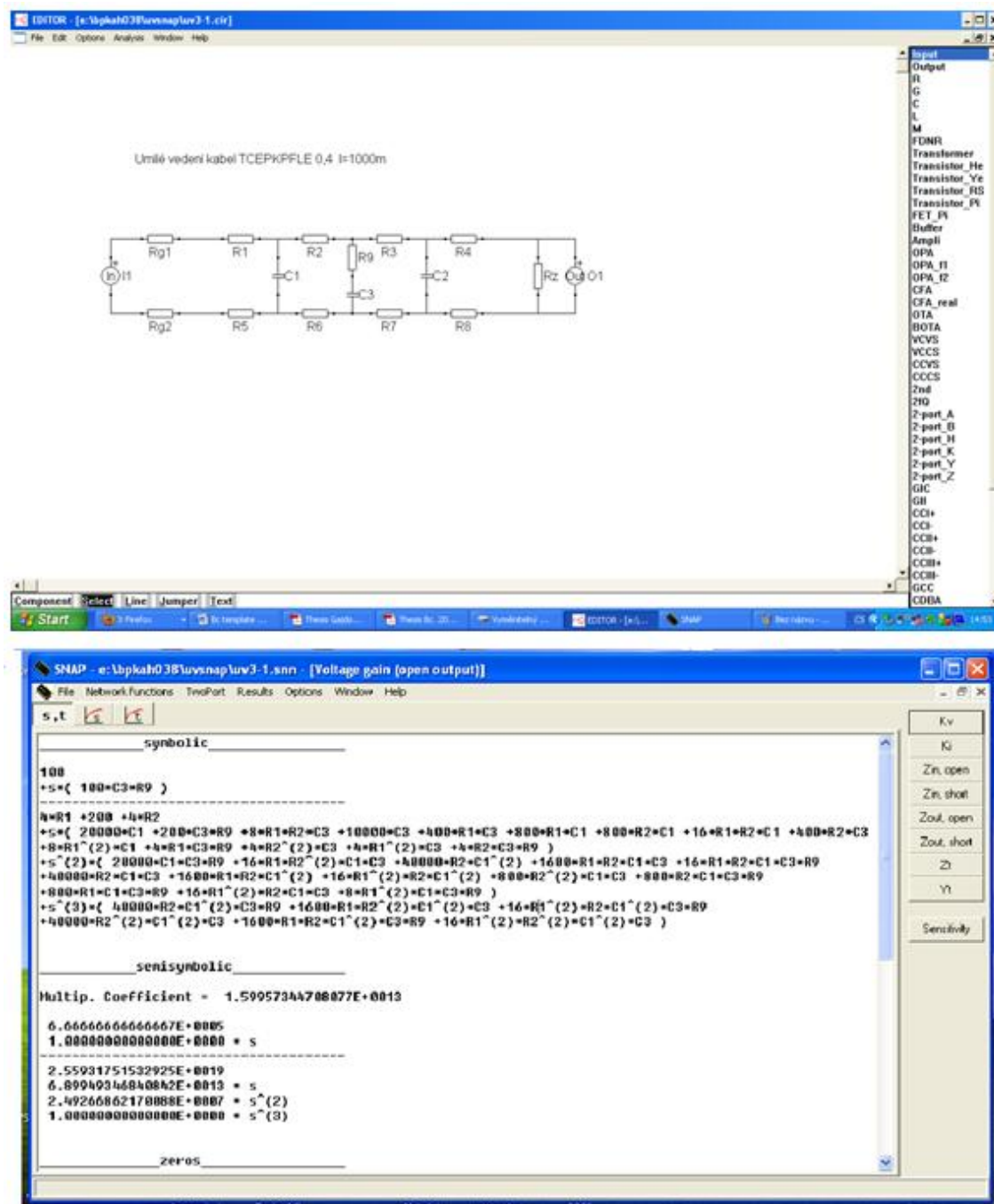
Tabulka 1: Útlum na kabelů 1000m

f[kHz]	Přenos G[dB]		
	Reálný kabel. Měření A[dB]	Simulace SNAP G[dB]	Umělé vedení .měření A[dB]
20	5,4	-7,6	7,6
40	5,4	-7,6	7,6
60	5,4	-7,63	7,6
80	5,5	-7,65	7,7
100	5,5	-7,67	7,8
200	6,5	-7,84	8
400	8,5	-8,41	8,5
600	9,5	-9,08	9,6
800	10,5	-9,7	10,7
1000	15,8	-10,25	12,8

Tabulka 2: Útlum na kabelů 500m

Z tabulky vidíme, že útlumu simulace umělého vedení odpovídá naměřená hodnota reálných kabelů. Experimenty byly provedeny pro délky 1000m a 500m. Simulace umělého vedení byly nejprve provedeny pomocí programu SNAP. Laboratorně naměřené hodnoty na reálných kabelech G[dB] jsou záporná čísla. Nicméně, ve snaze vyhnout se zmatku, uvádím dle normy všechny naměřené hodnoty s kladnými znaménky.

Řešení simulace pomocí SNAP



_____symbolic_____

100

+s*(100*C3*R9)

4*R1 +200 +4*R2

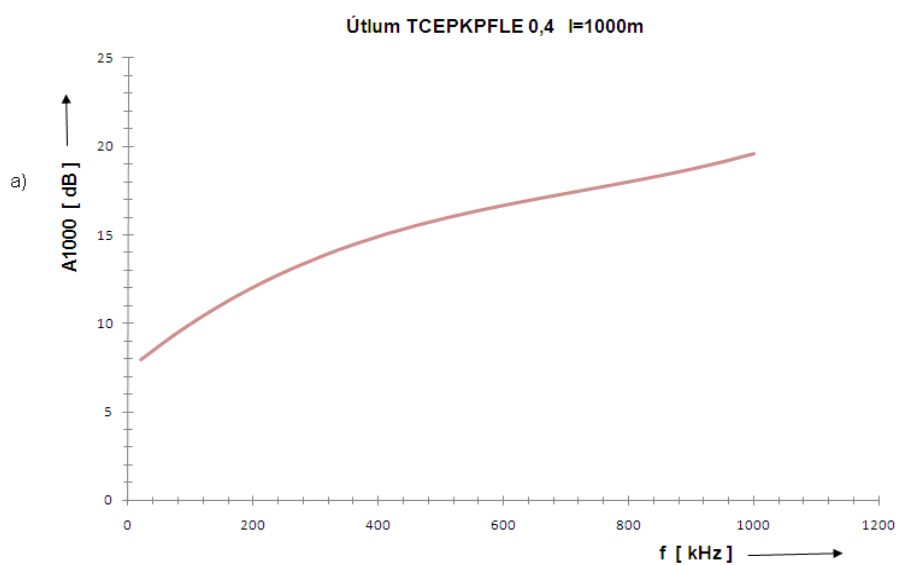
+s*(20000*C1 +200*C3*R9 +8*R1*R2*C3 +10000*C3 +400*R1*C3 +800*R1*C1
+800*R2*C1 +16*R1*R2*C1 +400*R2*C3 +8*R1^(2)*C1 +4*R1*C3*R9 +4*R2^(2)*C3
+4*R1^(2)*C3 +4*R2*C3*R9)

+s^(2)*(20000*C1*C3*R9 +16*R1*R2^(2)*C1*C3 +40000*R2*C1^(2)
+1600*R1*R2*C1*C3 +16*R1*R2*C1*C3*R9 +40000*R2*C1*C3 +1600*R1*R2*C1^(2)
+16*R1^(2)*R2*C1^(2) +800*R2^(2)*C1*C3 +800*R2*C1*C3*R9 +800*R1*C1*C3*R9
+16*R1^(2)*R2*C1*C3 +8*R1^(2)*C1*C3*R9)

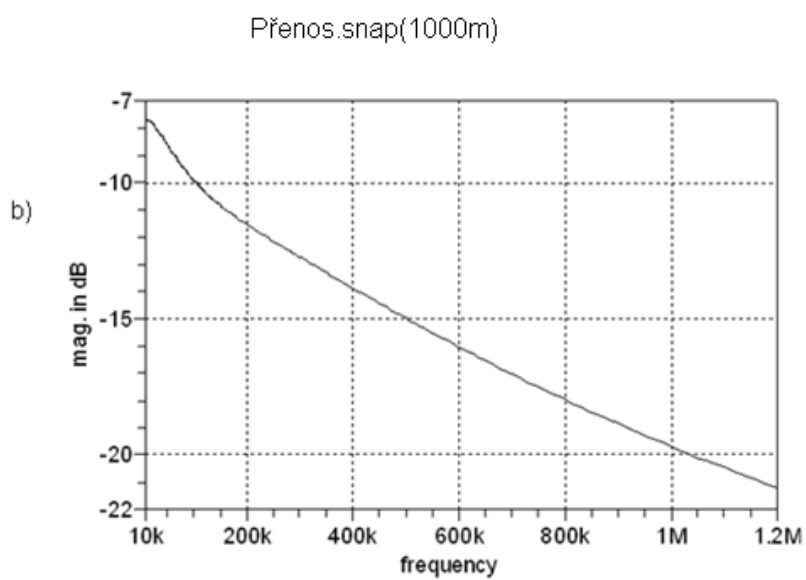
+s^(3)*(40000*R2*C1^(2)*C3*R9 +1600*R1*R2^(2)*C1^(2)*C3
+16*R1^(2)*R2*C1^(2)*C3*R9 +40000*R2^(2)*C1^(2)*C3
+1600*R1*R2*C1^(2)*C3*R9 +16*R1^(2)*R2^(2)*C1^(2)*C3)

Ke schématu Obr.13 patří tyto vzorce .Vzorce na Obr.16 jsou příliš složité. Proto byl zvolen jiný postup .V programu SNAP byla provedena postupná aproximace která se postupně blížila k experimentálním hodnotám, Byly zvoleny postupně počáteční hodnoty součástek ve schématu a pak byla vždy každá postupně měněna tak, aby se simulovaný průběh co nejlépe blížil experimentálním hodnotám.

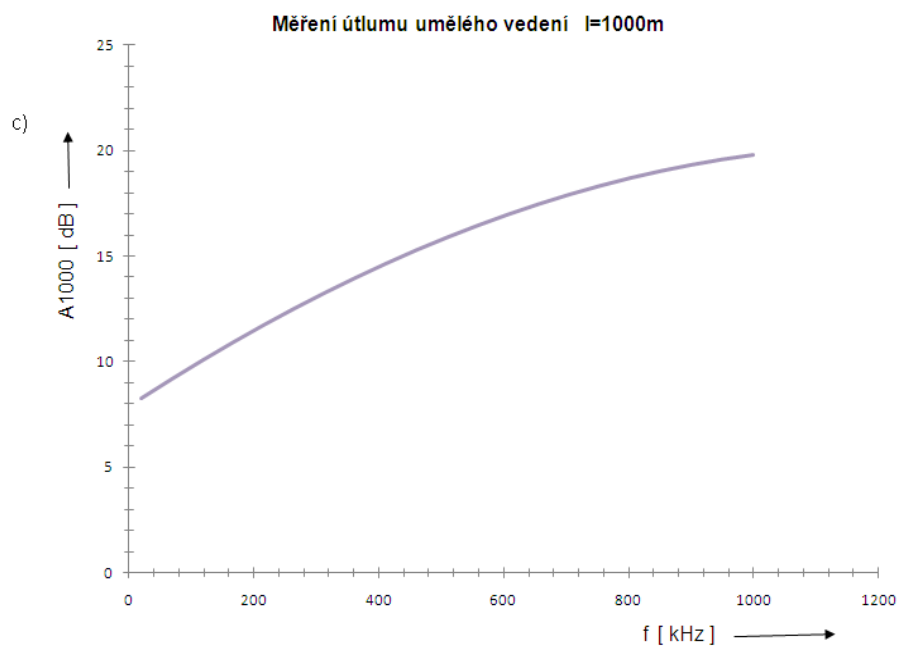
Naměřené grafy



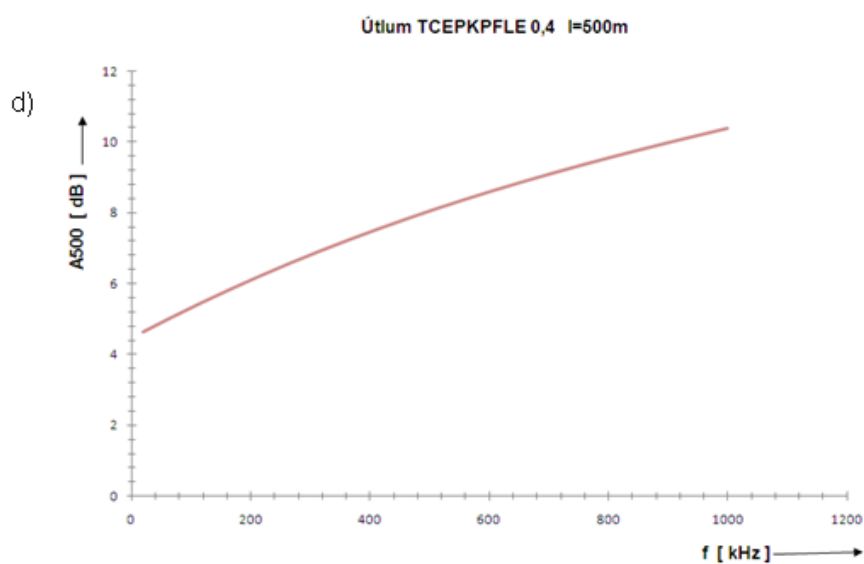
Graf 1: Útlum reálného kabelu



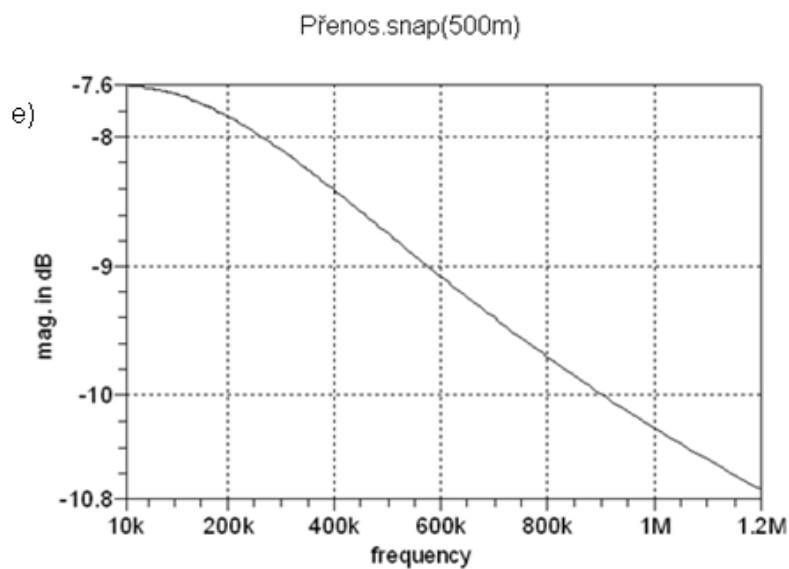
Graf 2: Simulace SNAP



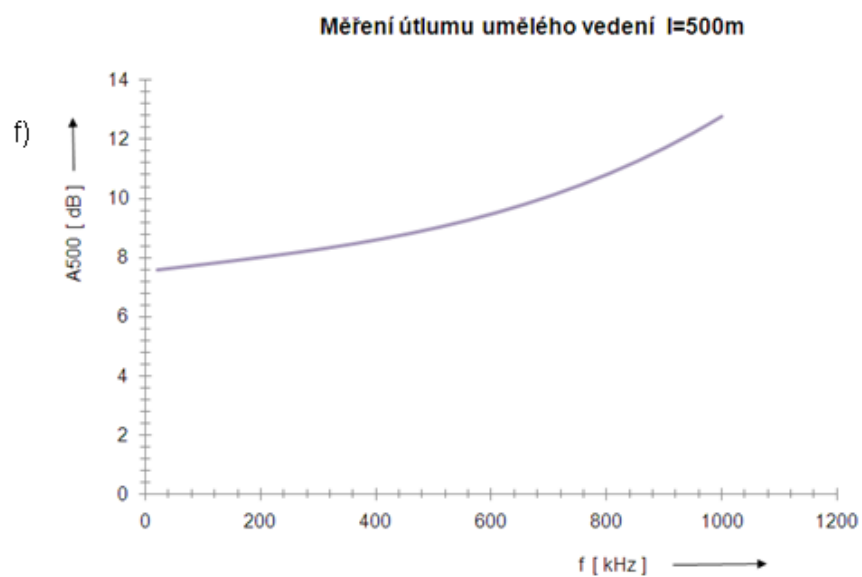
Graf 3: Útlum umělého vedení



Graf 4: Útlum reálného kabelu



Graf 5: Simulace SNAP



Graf 6: Útlum umělého vedení

Tyto grafy a,b,c zobrazují závislosti pro délku 1000m podle tabulky 1 a grafy d,e,f zobrazují závislosti pro délku 500m podle tabulky 2

5 Závěr

V této práci, jsem popsal v teoretické části typy a charakteristiky přenosového vedení, metody návrhu umělého vedení a měření jeho parametrů. V praktické části, jsem provedl měření útlumu reálného kabelu. Pak jsem navrhl umělé vedení. Porovnal jsem útlum reálného kabelu a umělého vedení. Výsledek měření reálného kabelu a umělého vedení jsou v dobré shodě.

Tento model umělého vedení lze použít pro ADSL pro měření útlumových charakteristik do kmitočtu maximálně 1MHz. Byly vytvořeny dva modely umělého vedení. Jeden pro délku 500m a druhý 1000m. Vytvořené modely byly úspěšně integrovány do laboratorních úloh na katedře telekomunikační techniky (KP 203 - Laboratoř přenosových médií).

Ve třetí části práce je modelování umělého vedení. Pro tuto část jsem použil materiály a příklad, který vysvětluje, postup návrhu umělého přenosového vedení v telekomunikační technice. Je založen na pojmu "alternativní zapojení" elementární délky homogenního vedení.. Tedy návrh, simulace, realizace a měření modelů umělého vedení byla dokončena úspěšně pomocí těchto materiálů.

Literatura

- [1] Jaroslav Svoboda a kolektiv, Telekomunikační technika, díl 1, Praha 2000
ISBN 80-901936-3-3
- [2] DOC. Ing. Jaroslav Svoboda, CSc., DOC. Ing. Boris Šimák, CSc., Ing. Tomáš Zeman
ZÁKLADY TELEINFORMATIKY, 2000 ČVUT.
- [3] T. Prokop, Umělé vedení v telekomunikační technice, Modul umělého vedení pro digitální
účastnické přípojky, Vydáno dne 16. 12. 2008, URL<
<http://www.comtel.cz/files/download.php?id=4086>>